第38卷 第4期
2021年7月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 4
Jul. 2021

生态输水对孔雀河地下水埋深及植被的影响

刘 璐[1,2]， 陈亚鹏[1]， 李肖杨[1,2]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院大学资源与环境学院，北京 100049）

摘 要： 为了解生态输水后地下水埋深和植被的变化，采用统计方法和遥感影像数据分析输水后孔雀河地下水埋深时空变化特征、地下水埋深和累积输水量的关系以及输水后NDVI和植被覆盖度的变化。结果表明：从时间变化来看，生态输水后孔雀河地下水埋深呈现稳步抬升趋势，年内地下水埋深变化主要受人类农业生产活动影响；从空间变化来看，垂直于河道方向上各断面地下水埋深的抬升幅度随距离的增加而减小，沿河道方向上，中游断面埋深抬升变化量最大；地下水埋深与累积生态输水量呈负相关，中游断面相关性最显著；2016—2019年上游和中游断面所在的研究河段NDVI分别增长了64.28%和100%，下游河段NDVI值稳定在0.05，距河道2 km范围内植被覆盖度呈增长趋势。生态输水对孔雀河流域地下水埋深和植被已产生积极作用，建议在未来的生态输水过程中保持合理输水量的同时，加强地下水监管力度，保护生态安全。

关键词： 孔雀河；生态输水；地下水埋深；NDVI；植被覆盖度

地下水是世界上分布最广泛的淡水资源，是人类重要的用水类型[1-2]。在我国西北干旱区，由于蒸发强烈，降水稀少，地下水成为人类社会和生态环境重要的保障水源[3]，但近年来随着气候变化以及人类活动干预等影响，地下水超采、水质恶化等现象愈加频繁，地下水数量上的短缺及质量上的恶化对生态环境产生巨大影响[4-5]。其中地下水位的变化不仅直接关系到依赖地下水生长的植被的变化[6]，同时影响到地下水环境演化模式的自然进程[7]。

孔雀河是塔里木河"四源一干"的重要组成部分，其中、下游的荒漠河岸林在维持当地生态系统稳定、保护国家"丝绸之路经济带"重大战略关键区域的生态安全上发挥着重要的作用。同时孔雀河是库尔勒—尉犁绿洲的重要水源，承担着农业灌溉、生态供水和向塔里木河输水的任务，具有重要的战略地位。在过去50 a间流域内对水资源的过度开采造成中下游河道断流，尤其在过去十余年间，因耕地面积不断扩大、严重超采地下水而导致地下水位迅速降低，孔雀河两岸胡杨林大面积死亡，荒漠河岸林生态系统遭到严重破坏，濒临崩溃[8-9]。

为恢复孔雀河两岸生态环境，新疆塔里木河流域管理局于2016年8月26日开始实施孔雀河生态应急补水工程。利用博斯腾湖多年高水位优势，从博斯腾湖调水至孔雀河。生态输水是补给地下水，修复脆弱生态环境的有效措施，在塔里木河[10-12]、黑河[13-14]、石羊河[15]都取得了显著的生态、社会和经济效益。以往对孔雀河的研究主要集中在下游断流河道植被的种间关系[16]和流域内植被生态需水估算[17]，然而对于生态输水后地下水埋深的影响研究较少[18-19]，且未涉及孔雀河生态输水与植被恢复等方面的科学问题。因此，本研究基于孔雀河近5 a生态输水及地下水埋深数据，并结合该流域的NDVI和植被覆盖度变化，分析了孔雀河生态输水后地下水埋深和植被的时空变化特征，旨在了解生态输水对地下水埋深和植被的影响及其原因，以期为孔雀河生态输水方案及流域生态恢复提供理论依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

孔雀河位于新疆塔里木盆地东北部，发源于我

收稿日期： 2020-10-15； **修订日期：** 2020-12-09
基金项目： 中国科学院战略性先导科技专项（XDA20100300）；国家自然科学基金（U1803101）
作者简介： 刘璐（1995-），女，硕士研究生，主要从事生态水文过程研究. E-mail: liulu181@mails.ucas.ac.cn
通讯作者： 陈亚鹏. E-mail: chenyp@ms.xjb.ac.cn

国最大的内陆淡水湖——博斯腾湖，全长942 km，自西向东流经库尔勒市和尉犁县，经过铁门关流入尾闾罗布泊[20]（图1）。孔雀河出流受博斯腾湖扬水站调节控制，流量较稳定[21]，2000—2019年河流多年平均径流量17.81×10^8 m^3。流域内气候为典型的温带大陆性气候，干燥少雨，蒸发强烈，多年平均降水量在62 mm左右，罗布泊降水量小于25 mm。流域内主要农作物为棉花，每年12月到次年2月为冬灌时期，3—4月为春灌时期，6—8月为棉花生长高峰期。孔雀河为库尔勒市提供生产生活用水，为流域内农业发展提供灌溉用水，维系着当地生态环境安全[17]。

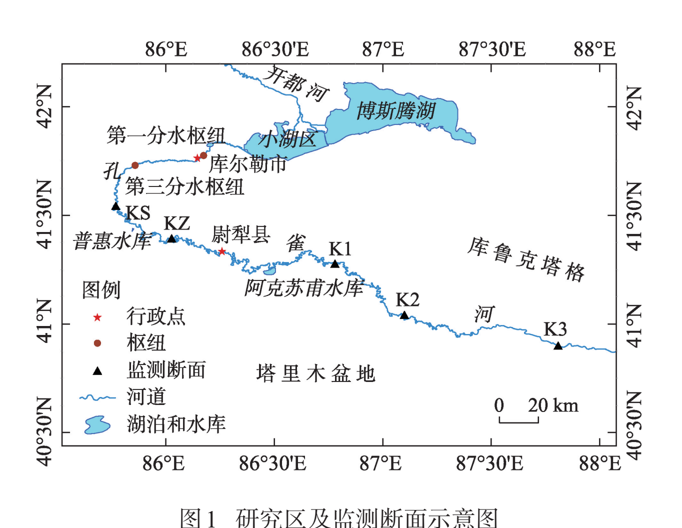


图1 研究区及监测断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area and monitoring section

孔雀河流域内天然植被主要有胡杨、柽柳等乔灌木，罗布麻、花花柴、芦苇等草本植物。中下游河道断流多年，植被严重退化，下游典型植物胡杨死亡量随河道距离的增加而升高，部分断面土壤养分流失增加，质地发生改变，土地沙漠化呈现加剧趋势[22]。从群落结构来看，K1断面具有较高的物种多样性和均匀度，K2断面物种组成相对不稳定，K3断面物种多样性高，均匀度较低[23]。

生态输水情况由表1可知，截至2019年12月31日，累计已进行4次生态输水，共向孔雀河输水15.73×10^8 m^3，水头最远抵达孔雀河大开屏处，输水使断流多年的孔雀河重新焕发生机。

1.2 数据来源与研究方法

针对孔雀河输水可能产生的生态效应，本文以普惠水库和阿克苏甫水库为节点将孔雀河河道划分为上、中、下游三部分，并沿输水河道布设了5个地下水监测断面。其中，在上游段布设KS断面，中游段布设KZ断面，下游段布设K1、K2和K3断面，每一断面距离孔雀河第一枢纽分别为72 km、146 km、360 km、455 km和570 km（图1）。在每个断面距河道100 m、200 m、400 m、600 m和800 m距离处分别设置1眼地下水监测井，5个断面共布设25眼监测井（K3断面100 m处监测井故障，无法获取数据）。

在上述5个地下水监测断面，利用HOBO（Campbell Scientific，Logan，UT，USA）自动水位计测量地下水埋深，监测频率为每18 h一次。Landsat 8 OLI影像数据来自于美国地质调查局（USGS）（https://earthexplorer.usgs.gov/），选取2016—2019年植被生长最茂盛且云量小于10%的7—8月的影像数据，其空间分辨率为30 m。运用统计软件Origin 2018对地下水数据进行统计分析，计算地下水埋深均值。利用SPSS 22进行累积输水量和地下水埋深的Pearson相关性分析以及各断面地下水埋深年平均变化的单因素方差分析。用ENVI 5.1对Landsat 8 OLI影像进行辐射定标、大气校正、镶嵌和裁剪，并通过NDVI计算工具对其结果进行归一化植被指数计算[24-25]，计算公式为：

$$\mathrm{NDVI}=\frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (1)$$

式中：NIR为近红外波段的反射数值；R为红光波段的反射数值。植被覆盖度通过混合像元二分模型进行计算，公式为：

表1 孔雀河生态输水数据

Tab. 1 Ecological water conveyance data of Kongque River

输水次数	开始时间	结束时间	持续天数/d	输水总量/10^4 m^3
第1次	2016-08-26	2016-10-09	45	11730
第2次	2017-08-01	2017-11-18	110	57100
第3次	2018-04-06	2018-10-11	189	43340
第4次	2019-04-10	2019-12-31	270	45150

$$f=\frac{NDVI-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}} \quad (2)$$

式中:f为植被覆盖度;$NDVI_{min}$为裸地的NDVI值;$NDVI_{max}$为完全被植被覆盖的像元的NDVI值。本文确定$NDVI_{min}$和$NDVI_{max}$的方法是计算图像NDVI值后,根据累积频率表分别以1%和99%频率的NDVI值作为$NDVI_{min}$和$NDVI_{max}$,运用公式(2)在ENVI 5.1中进行计算。覆盖面积计算使用ArcGIS 10.2将NDVI影像栅格进行重分类,根据单位像元面积和不同频率区间像元数量进行统计。

2　结果与分析

2.1　生态输水后地下水埋深在时间上的变化

对孔雀河地下水埋深监测数据进行计算得到多年平均地下水埋深(表2),探讨孔雀河地下水埋深的年际变化。由表2可知,各断面2019年地下水平均埋深较2017年有不同程度的抬升。KS和KZ断面地下水平均埋深分别抬升了1.37 m和4.32 m,抬升率为19.5%和29.6%;2015—2019年K1、K2和K3断面平均埋深分别抬升0.98 m、0.84 m、0.60 m,抬升率分别为15.0%、12.5%和28.4%。从多年平均埋深看,KZ断面埋深为12.03 m,K3断面埋深为1.8 m。KS、K1、K2断面多年平均埋深均在6 m左右。由地下水埋深年际变化曲线可知(图2),各断面地下水埋深都呈现抬升趋势,KS~K3断面的埋深变化趋势系数分别为-0.056、-0.182、-0.025、-0.0195和-0.015,平均变化幅度分别为1.15 m、4.05 m、1.20 m、0.72 m、1.66 m,说明KZ断面的埋深变化大于其他断面。此外,2017年生态输水后KS~K3断面地下水埋深显著抬升,变化幅度在0.97~6.4 m,2018年和2019年生态输水后埋深变化幅度分别为0.42~2.14 m和0.38~1.91 m。可见随着生态输水持续进行,地下水埋深的变化幅度逐年减小。

由地下水埋深年内变化曲线可知(图3),KZ断面年内地下水埋深变化最大,地下水埋深在1月中旬、3月下旬、6—8月和12月下旬增加,其中6—8月地下水埋深波动最为频繁。K3断面地下水埋深整体变化不大,2017年和2018年10月下旬之后埋深逐渐抬升,变化幅度在0.96~1.68 m。2019年K3断面地下水埋深分别在5月下旬至6月初以及11月上旬有两次明显抬升,变化幅度在1.0~1.44 m。KS、K1、K2断面地下水埋深变化趋势基本相同,年内变化幅度在0.57~1.78 m。

表2　2015—2019年各监测断面平均地下水埋深

Tab. 2　Average groundwater depth of each section in 2015-2019

	KS/m	KZ/m	K1/m	K2/m	K3/m
2015年	-	-	6.54	6.74	2.11
2016年	-	-	6.60	6.75	2.04
2017年	7.03	14.59	6.46	6.61	1.84
2018年	6.23	11.39	5.58	6.01	1.50
2019年	5.66	10.27	5.56	5.90	1.51
多年平均	6.31	12.03	6.12	6.40	1.80

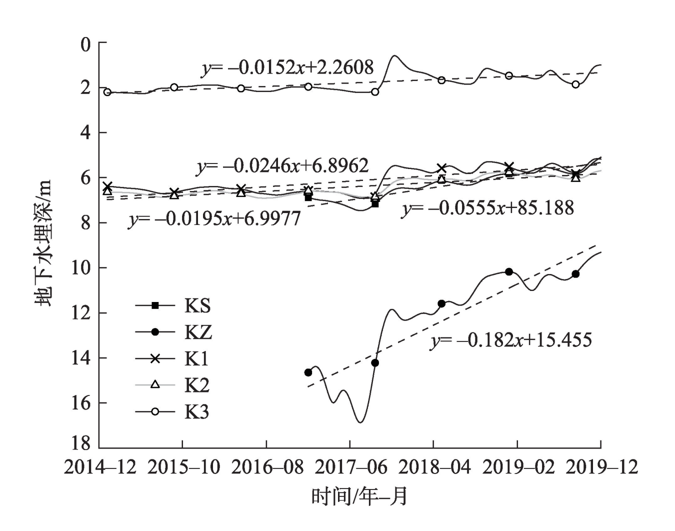


图2　孔雀河监测断面地下水埋深年际变化

Fig. 2　Interannual variation of groundwater depth at monitoring section of Kongque River

2.2　生态输水后地下水埋深在空间上的变化

图4为各断面地下水埋深年平均变化,统计可知2017—2019年KS地下水埋深均显著小于KZ断面(P<0.01),年平均差分别为7.59、5.16和4.60,差值逐年减小;2017—2019年KS埋深均显著大于K1、

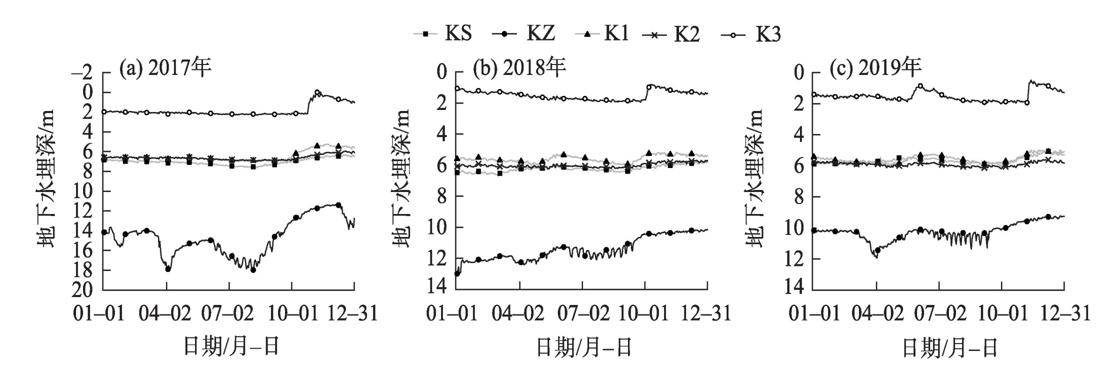


图3 孔雀河监测断面地下水埋深年内变化

Fig. 3 Annual variation of groundwater depth in Kongque River monitoring section

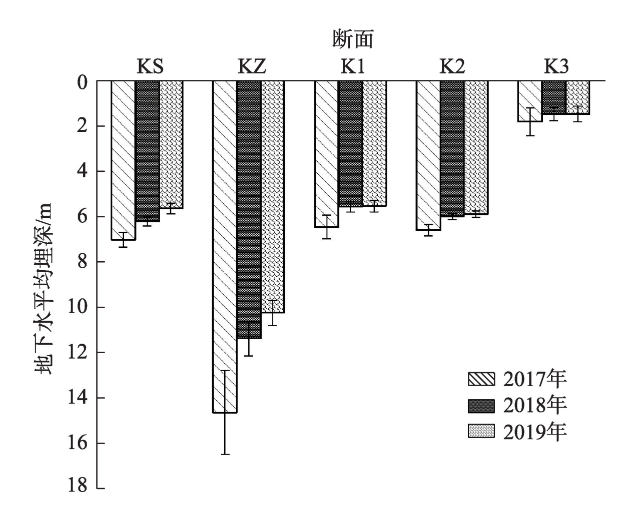


图4 各断面地下水埋深年平均变化

Fig. 4 Annual average variation of groundwater depth in all sections

K2(除2019年)、K3断面(P<0.01),其中K1的年平均差分别为0.57、0.64和0.10;K2的年平均差分别为0.41、0.22和−0.24;K3的年平均差分别为5.19、4.72和4.14。K1与K2断面地下水埋深间无显著性差异(P<0.01),但这两断面的埋深显著高于K3断面,约高出4 m多。

输水后地下水埋深在空间上的响应是评价生态输水效益的重要指标。计算KS~K3断面不同距离监测井2017—2019年生态输水后地下水埋深的抬升幅度,由图5可知,在垂直于河道方向上,各断面100 m处的地下水埋深抬升幅度最大,抬升量在0.55~8.52 m,随着距离的增加200 m、400 m、600 m和800 m处埋深抬升幅度逐渐减小,至800 m处抬升量在0.1~4.98 m。在沿河道方向上,KS~K3断面所有监测井的地下水埋深都有不同程度的抬升,KZ断面100~800 m平均埋深抬升幅度分别为4.49 m、3.91 m、3.28 m、2.97 m和2.79 m,抬升变化量最大;K2断面100~800 m平均埋深抬升幅度分别为0.84 m、0.72 m、0.55 m、0.44 m和0.37 m,抬升变化量最小。而距离更远的K3断面200~800 m平均埋深抬升幅度分别为1.57 m、1.54 m、1.28 m和0.57 m,大于K2断面同一距离埋深抬升幅度。

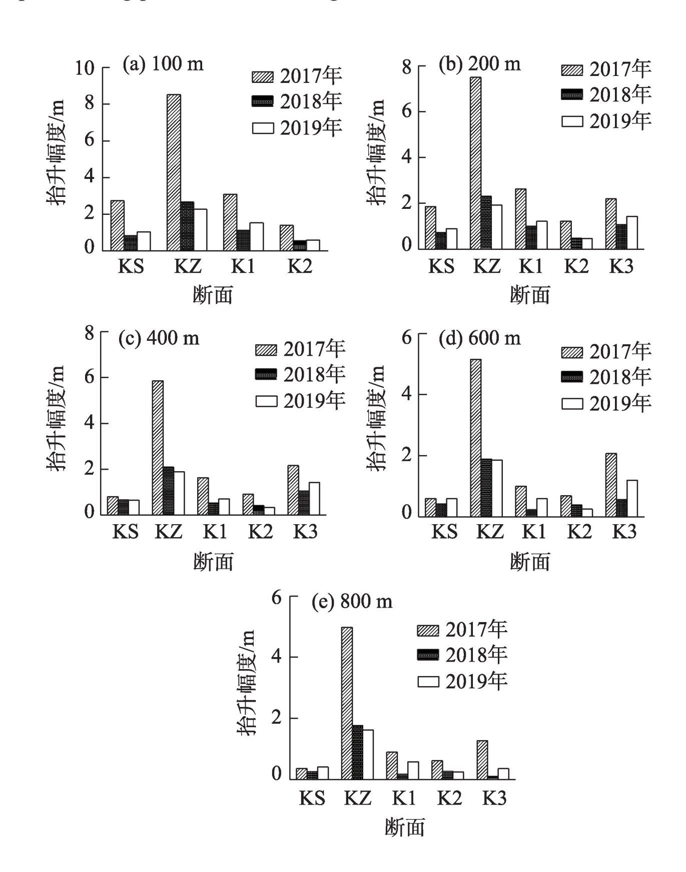


图5 输水后孔雀河不同断面地下水埋深抬升幅度变化

Fig. 5 Variation of groundwater depth rise in different sections of Kongque River after water conveyance

2.3 地下水埋深与累积生态输水量的关系

由2016—2019年累积输水量与月平均地下水埋深的变化关系可知(图6),在生态输水期间孔雀

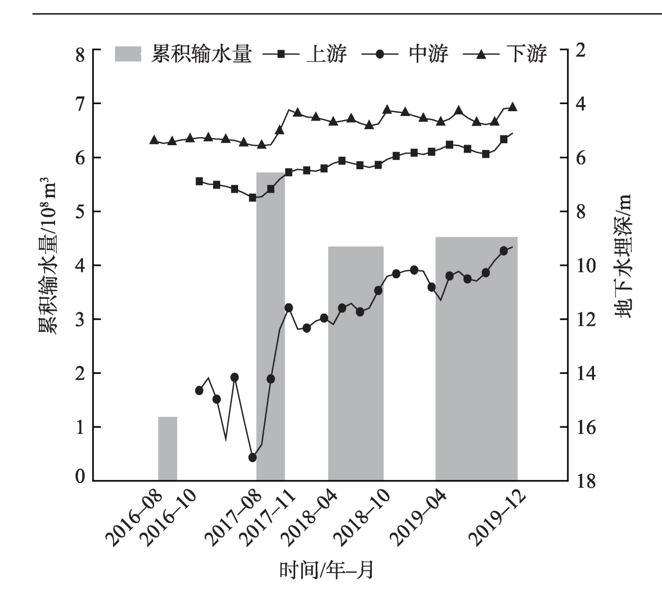


图6　累积输水量与地下水埋深变化

Fig. 6　Cumulative water conveyance and variation of groundwater depth

河各河段地下水埋深都有不同程度的抬升。第1次生态输水量较少,上、中、下游地下水埋深变化不大。第2次生态输水量增加,在此期间孔雀河中游的地下水埋深抬升了6.36 m,上游和下游的埋深分别抬升1.27 m和1.58 m,生态输水对地下水的补偿效果明显。第3次生态输水量比第2次生态输水量少,地下水埋深抬升幅度小,上、中、下游地下水埋深分别抬升了0.49 m、2.22 m和0.60 m。第4次输水量大于第3次输水量,上、中、下游地下水埋深分别抬升0.71 m、2.35 m和0.80 m,说明地下水埋深与累积生态输水量有关。

对各次累积输水量和各监测段面平均地下水埋深进行相关分析(表3),在0.01置信区间内,累积输水量与地下水埋深之间呈现Pearson负相关关系,其中KZ断面相关系数绝对值为0.77,在各断面中地下水埋深与累积生态输水相关性最为显著,说明输水对KZ断面地下水补给作用最强;K3断面相关系数绝对值为0.26,该断面累积生态输水与地下水埋深关系最弱,输水影响不显著。

表3　累积输水量与各监测断面平均地下水埋深的Pearson相关关系

Tab. 3　Pearson correlation between cumulative water conveyance and average groundwater depth of each section

监测断面	Pearson相关系数
KS	−0.316**
KZ	−0.773**
K1	−0.484**
K2	−0.326**
K3	−0.259**

注:**表示相关性在0.01层上显著(双尾)。

2.4　生态输水后NDVI和植被覆盖度的变化

地下水是孔雀河流域植被的主要水源,生态输水后地下水埋深抬升,其植被生长状况也发生变化。分别计算各河段2016—2019年7—8月的平均NDVI值。由图7可知,2016—2019年KS和KZ断面所在河段平均NDVI值变化较为显著。自2016年生态输水后,河道来水增多,植被增加,2016—2017年

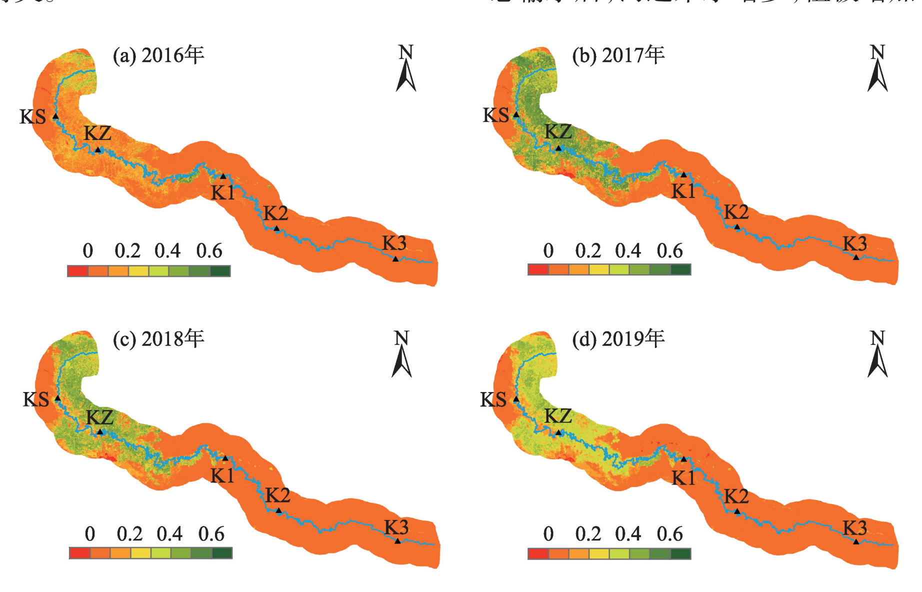


图7　2016—2019年孔雀河NDVI变化

Fig. 7　The NDVI changes of Kongque River in 2016–2019

KS所在河段平均NDVI值从0.14上升到0.29,KZ所在河段平均NDVI值从0.11增长到0.27。而2017—2019年KS所在河段平均NDVI值从0.29下降到0.23,KZ所在河段平均NDVI值从0.27下降到0.22。从整体变化趋势来看KS和KZ所在河段NDVI呈增加趋势。K1~K3所在河段由于土地荒漠化严重,植被主要集中于河道附近,平均NDVI值变化不大,稳定在0.05左右。

为进一步研究生态输水效益,分析孔雀河流域距河道2 km范围内的植被覆盖度变化。2016—2019年平均植被覆盖度从31.62%增长到43.74%,其中KS和KZ所在河段平均植被覆盖度较高,分别为60.02%和62.42%,K1~K3所在河段平均植被覆盖度为22.27%。从植被面积来看,距河道2 km内覆盖度为20%~40%的植被面积从2016年的603.76 km^2减小到2019年的322.31 km^2,覆盖度为40%~60%的植被面积从2016年的179.58 km^2减小到2019年的153.13 km^2,植被覆盖度大于60%的植被面积从2016年的126.89 km^2增加到2019年的438.02 km^2。

3 讨论

孔雀河生态输水工程实施以来已经取得明显成效,输水后地下水埋深抬升(图2)且抬升幅度随距河道距离的增加而减小,同时地下水埋深和生态输水量呈现负相关,这与Chen等[26]在塔里木河下游的研究结果一致。研究发现不同断面地下水埋深对生态输水的响应不同。上游断面地下水埋深变化小于中游(图5),这是由于上游断面距耕地较远且耕地面积较中游小,再加上相关部门进行联合执法活动取缔了大量非法泵站,严厉打击了沿河非法取水与非法地下水开采行为,抽水现象得到遏制,地下水埋深相对较稳定。输水对中游断面地下水补给作用最强,主要是因为中游断面周边农业生产灌溉和非法抽取地下水活动的存在,加大了地下水力坡度[18],输水后地下水埋深变化较大;下游断面主要为荒漠区[23],受人类活动影响小,因此地下水埋深变化较小。

地下水埋深不仅受生态输水量的影响,而且受输水持续时间的影响[26]。本研究发现地下水埋深与累积生态输水量呈现负相关,这与廖淑敏等[12]在塔里木河下游的研究结果一致。而在相近生态输水量下,地下水埋深的抬升幅度也有所不同。孔雀河第3次和第4次输水量相近,但输水持续时间相差81 d(表1),地下水埋深的抬升幅度在上、中、下游分别增加了45.4%、5.8%和33.3%。说明在相近输水量下,输水持续时间越长,对地下水的补给越多,地下水埋深的抬升幅度越大。因此建议生态输水过程中可延长输水时间,以增加地下水埋深的抬升幅度。

地下水是维系荒漠植物的重要水源[27],生态输水后NDVI值和植被覆盖度有所增加(图7),但是不同断面植被的恢复存在明显差异。例如在KS、K1、K2断面,输水后地下水埋深都在5.6 m左右,K3断面地下水埋深约1.5 m,但KS断面的NDVI值和植被覆盖度的增加明显高于K1、K2和K3断面。生态输水虽然抬升了两岸的水位,使其满足了植物生长适宜生态水位[28],但未改变地表水土环境。下游植被的原始生境恶劣,河道残留地表水矿化度高[22],沿河道方向上土壤质地沙化程度加剧,土地盐渍化严重[16],土壤养分含量低,pH值高[29],尤其是K3断面,由于地势低洼盐分汇集,形成高盐渍生境,土壤重度退化[23],再加上地下水的矿化度较高难以被植被利用,植物成活率和生长量低[30],导致下游段植被覆盖度低。

人类活动是影响地下水埋深年内变化的主要因素。张军峰等[31]研究发现近40 a孔雀河绿洲区耕地面积大幅增加,在农作物生长旺盛的6—8月,由于对灌溉需水量的增加,导致地下水开采活动增加,地下水埋深波动频繁。这种变化在中游断面表现最为明显(图3),主要是由于中游监测井附近有较大面积的耕地[32],地下水埋深随农业灌溉呈现季节变化。生态输水工程使地下水得到有效补给,再加上相关部门开展的联合执法行动,严厉打击了沿孔雀河非法取水与非法地下水开采行为,有效保障了生态输水的恢复效益。但是非法抽取地下水的情况并未完全遏制,相关部门应当合理控制流域耕地面积,使其保持在水资源承载范围内,加快沿岸胡杨林区退耕还水行动,加强联合执法力度。

4 结论

(1) 生态输水后,孔雀河地下水埋深与生态输水量呈现显著负相关关系,且有稳步抬升趋势,地

下水埋深抬升幅度从河道向两岸递减；不同断面地下水埋深对生态输水的响应程度不同，输水对中游KZ断面地下水补给作用最强，对下游K3断面补给作用最弱；生态输水过程中，地下水埋深年内变化除受输水量的影响，还主要受灌溉抽水影响，其中KZ断面尤为显著，其地下水埋深变化最大。

（2）生态输水后孔雀河流域植被得到了一定恢复，但不同河段植被的恢复存在明显不同。由于下游段（K1~K3断面）地下水含盐量和地表盐分较高等原因，NDVI值和植被覆盖度的增加明显小于上游段KS断面和中游段KZ断面。因此，生态输水工程应是一个长期的过程，不仅要抬升水位，同时还要改善地下水水质，才能使得孔雀河下游的植被得到有效恢复。此外在生态输水过程中，建议通过机械措施分段拦坝，以实施面上补水，改善地表土壤环境，以加速孔雀河下游植被的恢复。

（3）生态输水已经产生明显的生态效益，建议在未来的生态输水过程中保持合理输水量的同时，控制流域耕地面积，加强地下水监管力度，保护生态安全。

参考文献（References）：

[1] IEMD Graaf, Gleeson T, Beek L, et al. Environmental flow limits to global groundwater pumping[J]. Nature, 2019, 574(7776): 90–94.

[2] 孙海涛, 陈亚鹏, 陈亚宁, 等. 塔里木河下游荒漠河岸林地下水蒸散发[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 116–125. [Sun Haitao, Chen Yapeng, Chen Yaning, et al. Groundwater evapotranspiration in desert riparian forest in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 116–125.]

[3] 贾利民, 郭中小, 龙胤慧, 等. 干旱区地下水生态水位研究进展[J]. 生态科学, 2015, 34(2): 187–193. [Jia Limin, Guo Zhongxiao, Long Yinhui, et al. Research advances in ecological groundwater level in arid areas[J]. Ecological Science, 2015, 34(2): 187–193.]

[4] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295–1304. [Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1295–1304.]

[5] 张长春, 邵景力, 李慈君, 等. 地下水位生态环境效应及生态环境指标[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(3): 6–10. [Zhang Changchun, Shao Jingli, Li Cijun, et al. Eco-environmental effects on groundwater and its eco-environmental index[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(3): 6–10.]

[6] 黄金廷. 半干旱区蒸散发对地下水变化响应机制研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. [Huang Jinting. The Responses of Evapotranpiration to the Groundwater Changes in the Semi-arid Area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.]

[7] 张楠. 气候变化和人类活动影响下伊舒盆地地下水环境演化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017. [Zhang Nan. Research on Groundwater Environmental Evolution of Yishu Basin under the Impact of Climate Change and Human Activities[D]. Changchun: Jilin University, 2017.]

[8] 李卫红, 吾买尔江·吾布力, 马玉其, 等. 基于河–湖–库水系连通的孔雀河生态输水分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(1): 130–135. [Li Weihong, Wumaierjiang Wubuli, Ma Yuqi, et al. Ecological water conveyance project based on River-Lake-Reservoir connected system in the Kongque River[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(1): 130–135.]

[9] 李肖杨, 陈亚宁, 刘璐, 等. 博斯腾湖流域水资源管理决策支持系统设计与实现[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 53–59. [Li Xiaoyang, Chen Yaning, Liu Lu, et al. Design and implementation of water resources management decision support system in the Bosten Lake Basin[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 53–59.]

[10] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 等. 塔里木河下游地下水位对植被的影响[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 542–549. [Chen Yaning, Li Weihong, Xu Hailiang, et al. The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4): 542–549.]

[11] 王希义, 彭淑贞, 徐海量, 等. 大型输水工程的生态效益与社会经济效益评价——以塔里木河下游为例[J]. 地理科学, 2020, 40(2): 308–314. [Wang Xiyi, Peng Shuzhen, Xu Hailiang, et al. Evaluation of ecological and social-economic benefits of large water conveyance projects: A case study on the lower reaches of the Tarim River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(2): 308–314.]

[12] 廖淑敏, 薛联青, 陈佳澄, 等. 塔里木河生态输水的累积生态响应[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 120–126. [Liao Shumin, Xue Lianqing, Chen Jiacheng, et al. Cumulative ecological response of ecological water transmission in Tarim Rver[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 120–126.]

[13] 张一驰, 于静洁, 乔茂云, 等. 黑河流域生态输水对下游植被变化影响研究[J]. 水利学报, 2011, 42(7): 757–765. [Zhang Yichi, Yu Jingjie, Qiao Maoyun, et al. Effects of eco-water transfer on changes of vegetation in the lower Heihe River basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(7): 757–765.]

[14] 徐永亮, 于静洁, 张一驰, 等. 生态输水期间额济纳绿洲区地下水动态数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(4): 11–18. [Xu Yongliang, Yu Jingjie, Zhang Yichi, et al. Groundwater dynamic numerical simulation in the Ejina Oasis in an ecological water conveyance period[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4): 11–18.]

[15] 赵军, 杨建霞, 朱国锋. 生态输水对青土湖周边区域植被覆盖度的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1251–1261. [Zhao Jun,

Yang Jianxia, Zhu Guofeng. Effect of ecological water conveyance on vegetation coverage in surrounding area of the Qingtu Lake[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(6): 1251−1261.]

[16] 刘亚琦, 刘加珍, 陈永金, 等. 孔雀河下游断流河道的环境特征及物种间关系[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2706−2718. [Liu Yaqi, Liu Jiazhen, Chen Yongjin, et al. Environmental characteristics and interspecific associations in the lower reaches of the Kongque River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 2706−2718.]

[17] 周洪华, 吾买尔江·吾布力, 郝兴明, 等. 孔雀河流域天然植被生态需水量估算[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(2): 140−144. [Zhou Honghua, Wumaierjiang Wubuli, Hao Xingming, et al. Estimation of ecological water demand of natural vegetation in Konque River Basin[J]. Environment and Sustainable Development, 2017, 42(2): 140−144.]

[18] 马建新, 吾买尔江·吾布力, 黄湘, 等. 孔雀河应急输水后的地下水响应研究[J]. 新疆环境保护, 2017, 39(1): 13−17. [Ma Jianxin, Wumaierjiang Wubuli, Huang Xiang, et al. Research on groundwater responses after emergency water conveyance of Peacock River [J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2017, 39(1): 13−17.]

[19] 何志刚. 孔雀河下游生态输水现状及修复对策探析[J]. 陕西水利, 2019, 9(9): 39−40. [He Zhigang. An Analysis of ecological water conveyance status and restoration countermeasures in the lower Reaches of Kongque River[J]. Shaanxi Water Resources, 2019, 9(9): 39−40.]

[20] 陈亚宁. 新疆塔里木河流域生态保护与可持续管理[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [Chen Yaning. Ecological Protection and Sustainable Management of the Tarim River Basin[M]. Beijing: Science Press, 2015.]

[21] 陈亚宁, 杜强, 陈跃滨, 等. 博斯腾湖流域水资源可持续利用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013. [Chen Yaning, Du Qiang, Chen Yuebin, et al. Sustainable Water Resources Utilization in Bosten Lake Basin[M]. Beijing: Science Press, 2013.]

[22] 刘加珍, 李卫红, 陈永金, 等. 孔雀河下游衰退河岸林的沙漠化分析[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2018, 31(1): 65−71, 103. [Liu Jiazhen, Li Weihong, Chen Yongjin, et al. Analysis on desertification of degraded riparian forest in the lower reaches of Peacock River[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2018, 31(1): 65−71, 103.]

[23] 刘加珍, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 新疆孔雀河下游退化植被对环境的响应研究[J]. 新疆环境保护, 2017, 39(1): 1−7, 17. [Liu Jiazhen, Li Weihong, Chen Yapeng, et al. Research on environmental responses of vegetation degradation in the lower reaches of Peacock River[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2017, 39(1): 1−7, 17.]

[24] 陈海燕, 陈亚宁. 新疆塔里木河干流荒漠河岸林植被带变化[J]. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3166−3173. [Chen Haiyan, Chen Yaning. Changes of desert riparian vegetation along the main stream of Tarim River, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34 (11): 3166−3173.]

[25] 段峥嵘, 祖拜代·木依布拉, 夏建新. 基于NDVI的干旱区绿洲植被覆盖度动态变化分析——以新疆阿克苏地区为例[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2018, 27(2): 5−14. [Duan Zhengrong, Zubaidai Muyibula, Xia Jianxin. Analysis of vegetation coverage dynamic change in typical oasis of arid areas based on NDVI: A case study of Aksu region in Xinjiang [J]. Journal of Minzu University of China (Natural Sciences Edition), 2018, 27(2): 5−14.]

[26] Chen Y N, Zhang X L, Zhu X M, et al. Analysis on the ecological benefits of the stream water conveyance to the dried-up river of the lower reaches of Tarim River, China[J]. Science China Earth Sciences, 2004, 47(11): 1053−1064.

[27] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 荒漠河岸林建群植物的水分利用过程分析[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 130−136. [Chen Yaning, Li Weihong, Chen Yapeng, et al. Water use process of constructive plants in desert riparian forest[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 130−136.]

[28] 郝兴明, 李卫红, 陈亚宁. 新疆塔里木河下游荒漠河岸(林)植被合理生态水位[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 838−847. [Hao Xingming, LI Weihong, Chen Yaning. Water table and the desert riparian forest community in the lower reaches of Tarim River, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2008, 32(4): 838−847.]

[29] 石瑞花, 李霞, 尹业彪, 等. 孔雀河流域天然植物多样性与地下水关系[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1553−1560. [Shi Ruihua, Li Xia, Yin Yebiao, et al. The relationship between plant diversity and groundwater in the Kongquehe River Basin[J]. Resources Science, 2009, 31(9): 1553−1560.]

[30] 陈永金, 陈亚宁, 刘加珍. 塔里木河下游植被覆盖度变化与地下水质关系[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 612−617. [Chen Yongjin, Chen Yaning, Liu Jiazhen. Correlationships between the coverage of vegetation and the quality of groundwater in the lower reaches of the Tarim River[J]. Environmental Science, 2010, 31(3): 612−617.]

[31] 张军峰, 孟凡浩, 包安明, 等. 新疆孔雀河流域人工绿洲近40年土地利用/覆被变化[J]. 中国沙漠, 2018, 38(3): 664−672. [Zhang Junfeng, Meng Fanhao, Bao Anming, et al. LUCC analysis of the upstream of the Kongqi River, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(3): 664−672.]

[32] 陈亚宁, 郝兴明, 陈亚鹏, 等. 新疆塔里木河流域水系连通与生态保护对策研究[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(10): 1156−1164. [Chen Yaning, Hao Xingming, Chen Yapeng, et al. Study on water system connectivity and ecological protection countermeasures of Tarim River Basin in Xinjiang[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(10): 1156−1164.]

Effect of ecological water conveyance on groundwater depth and vegetation in the Kongque River

LIU Lu[1,2], CHEN Yapeng[1], LI Xiaoyang[1,2]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To understand changes in groundwater depth and vegetation after ecological water conveyance, the spatial and temporal variation characteristics of groundwater depth, the relationship between groundwater depth and cumulative water volume, and changes in the normalized difference vegetation index (NDVI) and vegetation coverage after water conveyance were analyzed using statistical methods and remote sensing image data. In regards to temporal variation, the results showed a steady upward trend in the groundwater depth of the Kongque River after ecological water transfer, and that the yearly change in groundwater depth was mainly caused by human agricultural production. In regards to spatial change, the range of rising groundwater depth decreased with increasing distance in each perpendicular section to the river channel. The change of the buried depth of the middle reach along the river direction was the largest. There was a negative correlation between groundwater depth and cumulative ecological water delivery. The correlation of the middle reach section was the most significant. From 2016 to 2019, the NDVI of the upstream and midstream sections increased by 64.28% and 100%, respectively, whereas the NDVI value of the downstream reach was stable at 0.05. The vegetation coverage within 2 km from the three river reaches showed an increasing trend. Thus, ecological water conveyance had a positive effect on groundwater depth and vegetation in Kongque River Basin. These results suggest that a reasonable water conveyance amount should be maintained to strengthen groundwater supervision and control, and to protect ecological security.

Keywords: Kongque River; ecological water conveyance; groundwater depth; NDVI; vegetation coverage